

Controle preditivo do tipo por estados finitos aplicado a um inversor monofásico conectado à rede elétrica

Lucas D. Augusto* Richelly D. F. Pontes*
José A. T. Altuna* Alfeu J. S. Filho*

* CECS, Universidade Federal do ABC, Santo André - SP, Brasil.
(e-mails: lucas.demetrius@ufabc.edu.br, richelly.dayenne@ufabc.edu.br,
jose.torricon@ufabc.edu.br, alfeu.sguarezi@ufabc.edu.br).

Abstract: This paper has as its main contribution the design and development of a predictive controller applied to a single-phase H bridge inverter connected to the grid using LC filter. Simulations are used to validate the proposed control strategy. The main contributions of the work are: (I) Mathematical modeling of a single-phase inverter with LC filter for the application of predictive control; (II) Development of a predictive algorithm based on a Finite Control Set model; (III) Comparison of the proposed predictive controller in relation to a controllers: PI adjusted appropriately by the frequency response method and P+RES with the same PI proportional gain, with integral gain and resonance frequency adjusted empirically. Both controls are applied to a model of a single-phase inverter with LC filter connected to the grid developed in the Matlab®/Simulink® software.

Resumo: Esse artigo tem como principal contribuição o projeto e desenvolvimento de um controlador preditivo aplicado a um inversor monofásico em ponte H conectado à rede elétrica com emprego de filtro LC. Simulações são utilizadas para validar a estratégia de controle proposta. As principais contribuições do trabalho são: (I) Modelagem matemática de um inversor monofásico com filtro LC para a aplicação do controle preditivo; (II) Desenvolvimento de algoritmo preditivo baseado em modelo do tipo Finite Control Set; (III) Comparação do controlador preditivo proposto em relação aos controladores: PI ajustados adequadamente pelo método da resposta em frequência e P+RES com o mesmo ganho proporcional do PI, com ganho integral e frequência de ressonância ajustados de forma empírica. Ambos os controles são aplicados a um modelo de um inversor monofásico com filtro LC conectado à rede elétrica desenvolvido no software Matlab®/Simulink®.

Keywords: Model Predictive Control; Grid Connected System; PWM inverter with LC filter; Voltage Source Inverter.

Palavras-chaves: Controle preditivo; Sistema conectado à rede; Inversor PWM com filtro LC; Inversor de tensão monofásico.

1. INTRODUÇÃO

O emprego de sistemas renováveis de energia como eólica, solar e armazenadores de energia conectados à rede elétrica desempenham um papel importante devido às preocupações com emissões de CO₂ e a flexibilização das fontes de energia elétrica. Neste contexto, o inversor monofásico surge como uma alternativa interessante para a injeção de potência proveniente destes sistemas na rede elétrica Wu et al. (2005). Esses dispositivos têm várias topologias e, também, são amplamente utilizados em diversos tipos de aplicações, dentre as quais podemos citar: filtros ativos de potência, sistemas de energia ininterrupta, etc Pimentel et al. (2006).

A conexão do inversor monofásico em ponte H é realizada com emprego de filtros passivos. Para a escolha do filtro, leva-se em consideração alguns fatores, sendo estes os custos de implementação, manutenção, peso, volume, dentre

outros aspectos. De acordo com a estratégia de modulação escolhida para o inversor, designa-se o filtro que deve ser colocado na sua saída com o propósito de entregar para a carga uma tensão senoidal sem distorções Menezes (2007). Os filtros podem ser do tipo L, LC ou LCL Yagnik and Solanki (2017). Por possuir características passa-baixa, o filtro LC de saída anexado à topologia proposta neste trabalho, pretende eliminar as componentes harmônicas de alta frequência advindas do processo de chaveamento do inversor. A minimização dos reativos requerido pelo inversor, assim como a diminuição da variação da tensão na carga, dos custos do circuito de filtragem, do peso e volume do filtro comparada a outras topologias de filtro passivo, justifica a escolha deste Menezes (2007).

Para a injeção decorrente na rede elétrica com emprego do inversor monofásico em ponte H é necessário operar com sistema de controle em malha fechada. O controlador PI é amplamente empregado tanto no controle de

malha de corrente, assim como, no controle da tensão do barramento, Cherati et al. (2011) e Silva et al. (2013). Uma desvantagem do controlador PI é de seus ganhos serem ajustados para apenas um ponto fixo de operação e uma alteração pode degradar o desempenho do sistema de controle.

Uma alternativa ao PI é o controle P+Ressonante que tem a mesma estratégia para obtenção do ganho proporcional que o PI, porém utiliza um integrador de segunda ordem com a finalidade de atingir um alto ganho em uma frequência específica, também denominada de ω_c (frequência de ressonância) Teodorescu et al. (2006). É possível implementar um controlador P+Ressonante para conseguir um erro pequeno em estado estacionário com a possibilidade de variar sua largura de banda segundo o valor do ω_c , isto pode ser útil para reduzir a sensibilidade em relação a perturbações Chirapo (2018) Chirapo et al. (2020).

Seguindo nas técnicas de controle empregadas, algumas são como o controle por histerese de acordo com Bode and Holmes (2000), porém esta técnica opera com frequência de chaveamento variável e dificulta o projeto dos filtros. Outros exemplos de controladores são o por lógica difusa/Fuzzy Premrudeepreechacharn and Poapornsawan (2000), por redes neurais Fu and Li (2015). O primeiro depende de um conhecimento do projetista em detalhes do projeto e o segundo necessita-se escolher adequadamente redes para treinamento. Em função disso o desempenho do sistema pode ser degradado.

Outra estratégia de controle no qual seu interesse tem aumentado é o controle preditivo, Rodriguez and Cortes (2012), Mayne et al. (2000). Nesta técnica o controlador faz a predição do comportamento da planta através do emprego do seu modelo matemático e a partir de uma função custo minimizada, seleciona o valor para a entrada de forma que as referências sejam atendidas.

No trabalho Atia and Salem (2013) foi proposta uma técnica de controle preditivo para um inversor monofásico em ponte H e com filtro L do tipo de controle de estados finito (*finite control set*) com frequência de chaveamento fixa onde resultados interessantes de simulação validam a proposta.

Em Song et al. (2015) foi proposto um controle preditivo do tipo MP-DPC (*Model Predictive-Direct Power Control*) com estágio modulação PWM comparado a um controle FCS-MP-DPC do tipo *Finite Control Set* e um controle PI para a aplicação em um inversor monofásico como retificador de potência, mostrando uma comparação de desempenho desses três tipos de controles e resultados que visam comprovar as características da proposta.

Na proposta de Liu et al. (2017), é aplicado o controle preditivo do tipo MPC-FCS *Model Predictive Control - Finite Control Set* a um inversor monofásico com filtro LC na saída conectado a rede elétrica utilizando um transformador de 1:3 para o acoplamento. Quanto à elaboração do modelo matemático foi utilizada uma topologia de filtro LC com a aplicação de apenas um indutor e um capacitor considerando sua respectiva resistência interna, diferente da topologia do filtro LC aqui proposta com dois indutores e um capacitor. Apesar de ambos os trabalhos utilizarem as leis de Kirchoff para obtenção do modelo matemático no

formato de espaço de estados, as diferenças nas topologias do filtro LC implica em equações diferentes, em consequência existem diferenças nos algoritmos preditivos apresentados, porém ambos os trabalhos utilizam um horizonte deslizante igual prevendo apenas o próximo estado futuro.

A tensão do inversor e a corrente da rede são mensuradas, já a corrente do indutor e a tensão sobre o capacitor são deduzidas em Liu et al. (2017), na proposta aqui apresentada é efetuada a medição da corrente do indutor e da corrente e tensão da rede, já a tensão sobre o capacitor é deduzida pelas equações do modelo. Outra diferença está relacionada com a função de custo, no trabalho citado é efetuada a diferença entre as correntes da rede de referência e deduzida pelo modelo, além de utilizar a tensão do inversor com auxílio de fatores de ponderação, na proposta atual é utilizado o módulo com a diferença entre a tensão do capacitor que é a tensão da rede mensurada com a tensão sobre o capacitor deduzida pelo modelo. Quanto à modulação PWM utilizada, ambos os trabalhos utilizam a mesma técnica com aplicação direta do estado mais adequado ao invés de usar técnicas modulação senoidal. Os resultados obtidos comprovam a eficiência do controle proposto.

Dito isto, este trabalho apresenta a técnica de controle preditivo por estados finitos aplicado ao inversor monofásico em ponte H conectado à rede elétrica com emprego de filtro LC. Basei-se no trabalho de Elthokaby et al. (2016) o qual aplicou este controlador preditivo em uma fonte de energia ininterrupta. Será realizado a comparação aos controladores PI com ajuste projetado pelo método da resposta em frequência de acordo com Silva et al. (2013) e com o P+RES com o mesmo ajuste de ganho proporcional que o PI, porém com o ajuste do ganho integral e a frequência de ressonância efetuados empiricamente. Resultados de simulação serão apresentados para validar a proposta.

2. TOPOLOGIA E MODELO MATEMÁTICO DO INVERSOR MONOFÁSICO

O inversor monofásico empregado nesse trabalho funciona como uma fonte de tensão do tipo VSI (*Voltage Source Inverter*), sendo a tensão de saída estabelecida de acordo com o acionamento das chaves eletrônicas.

A topologia adotada para o inversor monofásico é mostrado na Figura 1, sendo está baseada no hardware do kit TMDSSOLARPEXPKIT fabricado e fornecido pela empresa Texas de acordo com o seu respectivo manual Bhardwaj and Subharmanya (2013), uma restrição relevante para o correto funcionamento deste conversor é garantir que os dois interruptores em cada perna operem de forma complementar para evitar curto-circuito com a fonte de alimentação CC.

A Tabela 1 apresenta os valores de tensão de saída do conversor apresentado na Figura 1 de acordo com o acionamento das chaves de cada braço. Esses vetores são aplicados no filtro LC, que além de fazer a interface com a rede elétrica, tem a finalidade de filtrar os ruídos indesejados gerados durante o chaveamento.

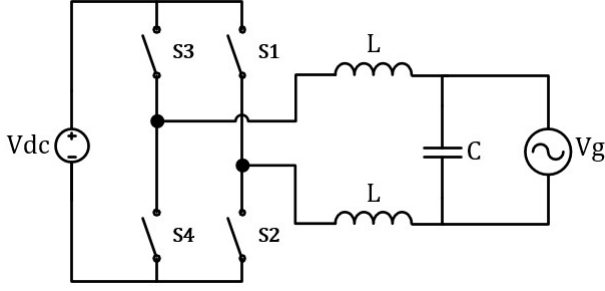


Figura 1. Topologia do inversor monofásico com filtro LC conectado à rede elétrica.

2.1 Modelagem matemática do inversor com emprego de filtro LC

A topologia de inversor monofásico com emprego de filtro LC pode ser modelada com o emprego do circuito simplificado mostrado na Figura 2.

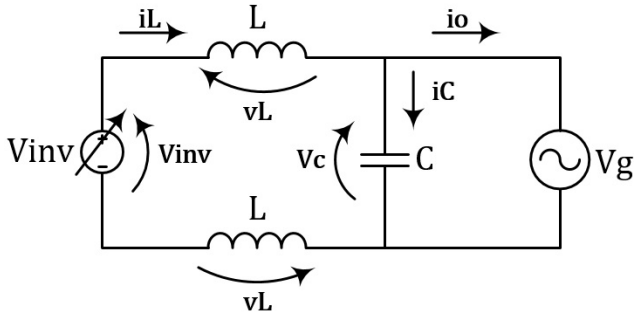


Figura 2. Circuito simplificado do inversor com filtro LC.

Para obtenção do modelo inicialmente é aplicado as lei das malhas de tensão de Kirchoff no circuito composto pelas tensões da fonte v_{inv} , indutores v_L e capacitor v_C :

$$v_{inv} - v_L - v_C - v_L = 0 \quad (1)$$

A Equação (1) pode ser reescrita, considerando que $v_L = L \frac{di_L}{dt}$ e isolando a tensão sobre o capacitor V_C :

$$v_C = v_{inv} - 2L \frac{di_L}{dt} \quad (2)$$

Sendo que i_L é a corrente que é injetada pelo barramento CC do inversor. Isolando-se a derivada da corrente em função do tempo $\frac{di_L}{dt}$ em (2) tem-se:

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{v_{inv} - v_C}{2L} \quad (3)$$

Em uma segunda etapa é aplicada as lei dos nós de corrente de Kirchoff:

Tabela 1. Vetores de tensão e estados de chaveamento.

Estados	S1	S2	S3	S4	Saída
1	ON	OFF	ON	OFF	0
2	ON	OFF	OFF	ON	-Vdc
3	OFF	ON	ON	OFF	+Vdc
4	OFF	ON	OFF	ON	0

$$i_L - i_C - i_O = 0 \quad (4)$$

A Equação (4) pode ser reescrita considerando que $i_C = C \frac{dv_C}{dt}$ e isolando a corrente sobre o indutor i_L :

$$i_L = i_O + C \frac{dv_C}{dt} \quad (5)$$

Isolando a derivada da tensão em função do tempo $\frac{dv_C}{dt}$ em (5) tem-se:

$$\frac{dv_C}{dt} = \frac{i_L - i_O}{C} \quad (6)$$

Em um rearranjo de (3) e (6) podem ser reescritas no formado do espaço de estados conforme mostrado em (7) e (8).

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} v_C \\ i_L \end{bmatrix} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} v_C \\ i_L \end{bmatrix} + \mathbf{B} \begin{bmatrix} v_{inv} \\ i_O \end{bmatrix} \quad (7)$$

Onde:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{C} \\ -\frac{1}{2L} & 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{C} \\ \frac{1}{2L} & 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

2.2 Modelo discretizado

Para a discretização de um sistema contínuo consideramos a equivalência apresentada em (9), onde T_s é o período de amostragem adotado.

$$\frac{dx}{dt} = \frac{x(k+1) - x(k)}{T_s} \quad (9)$$

Relacionando (3) e (6) com (9), obtém-se os modelos equivalente ao contínuo discretizados:

$$\frac{i_L(k+1) - i_L(k)}{T_s} = \frac{v_{inv}(k)}{2L} - \frac{v_C(k)}{2L} \quad (10)$$

$$\frac{v_C(k+1) - v_C(k)}{T_s} = \frac{i_L(k)}{C} - \frac{i_O(k)}{C} \quad (11)$$

Isolando-se da tensão atual sobre o capacitor $v_C(k)$ em (10) tem-se:

$$v_C(k) = v_{inv} - \frac{2L}{T_s} [i_L(k+1) - i_L(k)] \quad (12)$$

Isolando-se a tensão futura sobre o capacitor $v_C(k+1)$ em (11) tem-se:

$$v_C(k+1) = v_C(k) - \frac{T_s}{C} [i_L(k) - i_O(k)] \quad (13)$$

3. ESTRATÉGIA MODEL PREDICTIVE CONTROL FINITE CONTROL SET (MPC-FCS)

3.1 Algoritmo MPC-FCS

No MPC-FCS proposto neste trabalho é realizado o controle da corrente a ser injetada na rede elétrica que pode ser realizada com a escolha apropriada da sequência dos vetores de tensão em função do acionamento dos comutadores, conforme mostrado na Tabela 1. Sendo assim, inicialmente é realizado o cálculo da tensão $v_c(k)$ com emprego da corrente de referência $i(k+1)$ em (12), com emprego dos estados apresentados na Tabela 1. A referência de corrente pode ser imposta pelo projetista ou pode ser calculada através do erro da tensão no barramento e seu valor de referência com emprego de um controlador. No passo seguinte faz-se a predição da tensão do capacitor $v_c(k+1)$ empregando todas as possibilidades de (13). Após isto, faz-se a minimização da função custo de forma a escolher o estado das chaves que as referências sejam atendidas.

O diagrama em blocos mostrado na Figura 3 indica como foi implementado o MPC-FCS para o controle do inversor.

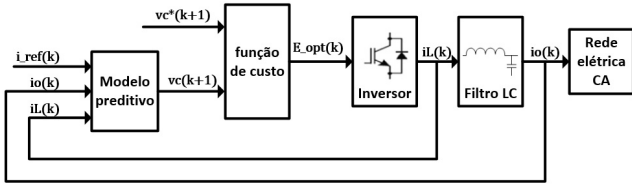


Figura 3. Diagrama em blocos do modelo preditivo implementado.

O algoritmo MPC-FCS aplicado neste estudo é entendido com a ajuda da Figura 4, podendo ser descrito em etapas da seguinte forma:

- (1) As variáveis de controle são medidas no início do intervalo de amostragem T_s ;
- (2) Para os quatro estados possíveis de comutação do conversor é efetuado o cálculo da tensão sobre o capacitor $v_c(k)$ e a predição sobre a a tensão do capacitor $v_c(k+1)$ dentro do intervalo de amostragem T_s ;
- (3) Função de custo avalia o erro para cada predição realizada;
- (4) Seleciona e aplica o estado de comutação otimizado de acordo com a função custo que minimiza o erro;

3.2 Função de custo

A função de custo é definida por (14):

$$g = |v_c^*(k+1) - v_c(k+1)| \quad (14)$$

Sendo que o primeiro termo $v_c^*(k+1)$ é a referência de tensão obtida da rede elétrica de acordo com o trabalho com a referência do inversor trifásico e o segundo termo $v_c(k+1)$ é a predição da tensão sobre o capacitor obtida pelo modelo matemático apresentado em (13). A função de custo é aplicada a todos os quatro vetores possíveis, dessa forma é selecionado o vetor mais adequado de acordo com o menor valor em módulo de g obtido.

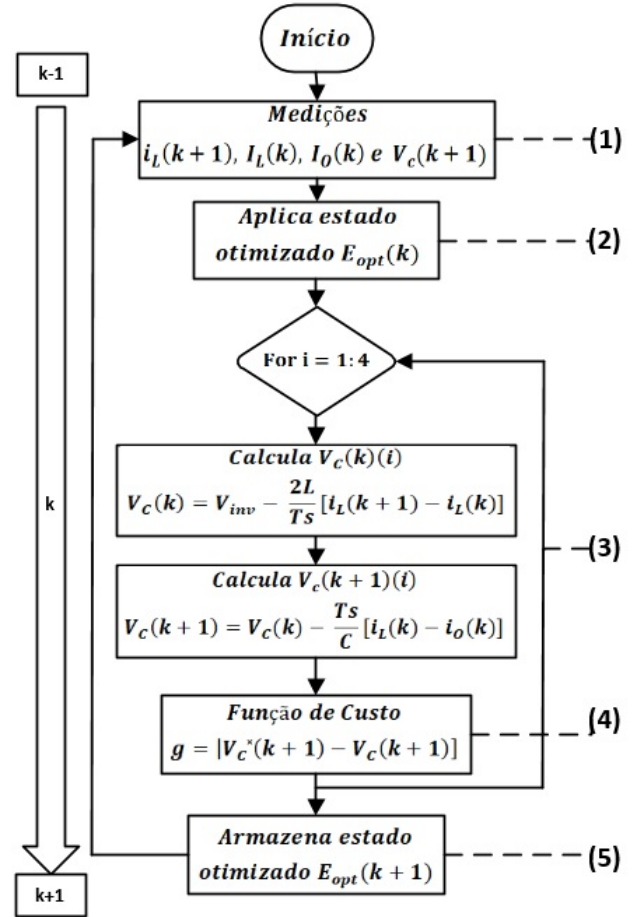


Figura 4. Fluxograma do modelo preditivo implementado.

4. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Para a análise do comportamento do controlador preditivo MPC-FCS proposto e a comparação com um outro método de controle clássico usando controladores PI, foi utilizado o ambiente de simulação Matlab®/Simulink® onde foi possível realizar a análise do controle da corrente a ser injetada na rede elétrica, assim como a resposta em degrau e a análise do THD (*Total Harmonic Distortion*). Foram usados os seguintes parâmetros de simulação:

Entrada de tensão do barramento $V_{dc} = 30V$, da rede elétrica $V_g = 24V$, indutância $L = 100\mu H$ e capacitância $C = 3\mu F$, valores de acordo com as especificações do encontradas no manual do kit TMDSSOLARPEXPKIT para o filtro LC prevendo uma futura implementação experimental Bhardwaj and Subharmanya (2013). Os outros parâmetros adotados foram: tempo de amostragem $T_s = 6,67\mu s$ e frequência de atualização de vetores $f = 150kHz$.

4.1 Resultados do controle preditivo MPC-FCS

Para constatar o funcionamento do controle proposto foi utilizado um degrau no sinal de controle, variando de 2A até 6A conforme mostrado na Figura 5. Observa-se que a referência senoidal foi atendida pelo MPC-FCS.

Na Figura 6 é possível ver o resultado da simulação para uma corrente constante de 5A, onde a corrente medida na rede elétrica está sobreposta a referência de corrente.

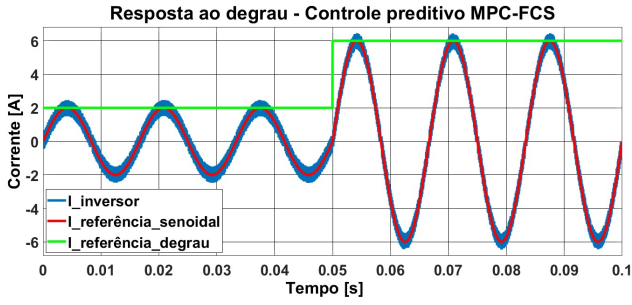


Figura 5. Degrau de referência e a respectiva resposta do controle preditivo MPC-FCS.

Novamente, o controlador atende a referência. A THD desta corrente ficou em torno de 6,50% conforme mostrado na Figura 7.

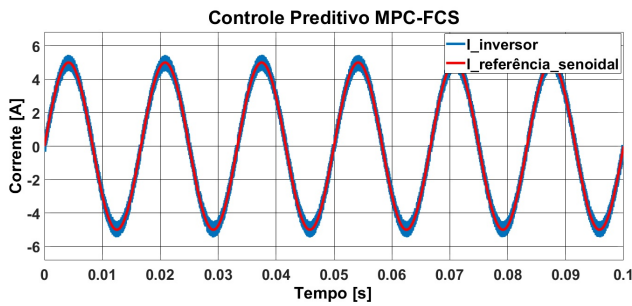


Figura 6. Operação em regime permanente do controlador MPC-FCS.

A potência injetada na rede elétrica com emprego do controle MPC-FCS proposto para a simulação da corrente de referência em 5A é de aproximadamente 60W conforme pode ser observado na Figura 8.

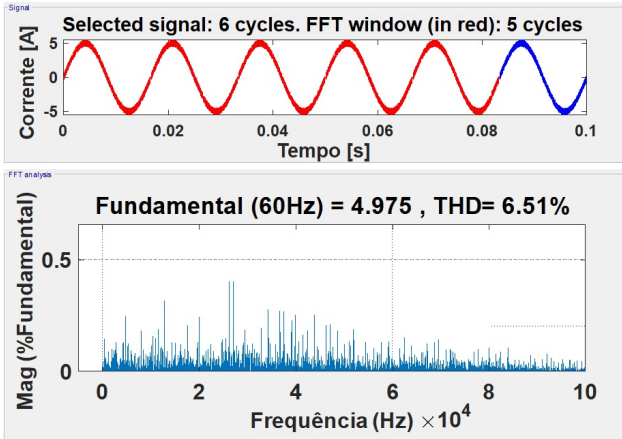


Figura 7. Distorção harmônica apresentada pela corrente a ser injetada na rede elétrica.

4.2 Resultados com emprego do controlador PI

Foram realizados testes de simulação com emprego de um controlador PI no laço da corrente para comparação com o controlador MPC-FCS. Os parâmetros empregados para esta simulação são os mesmos do início desta seção. Adicionalmente, a frequência da modulação unipolar é de $f_{PWM} = 20kHz$. Os ganhos do controlador PI foram

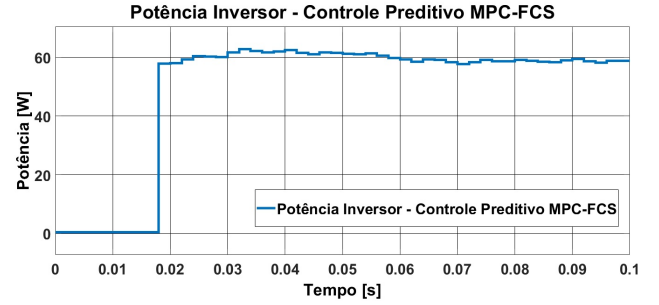


Figura 8. Potência obtida pelo inversor com o controle preditivo MPC-FCS.

ajustados em $k_p = 2,52$ e $k_i = 0,00035$, projetados conforme o método de diagrama de bode apresentado no trabalho de Silva et al. (2013).

Na Figura 9 é possível ver o resultado da simulação com emprego do controlador PI para uma corrente constante de 5A. Observa-se que o controlador segue a referência da corrente entretanto observa-se um erro de 5,68%, sendo esse valor obtido pela diferença percentual dos valores RMS medidos de ambas as correntes. O valor da THD da corrente injetada na rede elétrica é de 3,90% como apresentado na Figura 10. Este valor é menor quando comparado com o valor de THD quando o controlador MPC-FCS é empregado. Neste caso, o valor é 6,51% (Figura 7).

A potência injetada na rede elétrica pode ser observada na Figura 11 e seu valor é de aproximadamente 55W. Este valor é menor que o valor da potência injetada pela proposta desta trabalho que é de 60W (Figura 8), isso ocorre devido ao erro entre a referência de corrente e a corrente injetada na rede elétrica ser de 0,19%. Já o controlador PI não conseguir acompanhar o sinal de referência senoidal devido a sua banda passante, Ogata (2011).

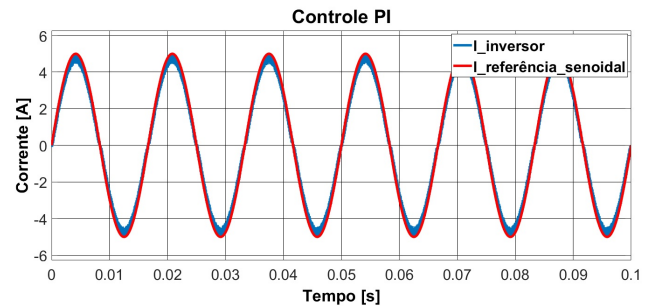


Figura 9. Sinal de referência senoidal de corrente e a corrente de saída do conversor.

4.3 Resultados com emprego do controlador P+RES

Adicionalmente, foram realizados testes de simulação com emprego de um controlador P+RES no laço da corrente para comparação com o controlador MPC-FCS. Os parâmetros empregados para esta simulação foram mantidos com relação ao controlador PI. Foram ajustados apenas o ganho $k_i = 30$ e $\omega_c = 60Hz$, parâmetros obtidos de forma empírica.

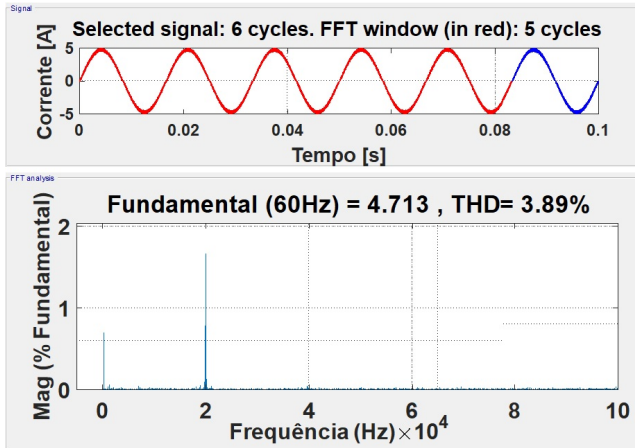


Figura 10. Distorção harmônica apresentada pela corrente a ser injetada na rede elétrica.

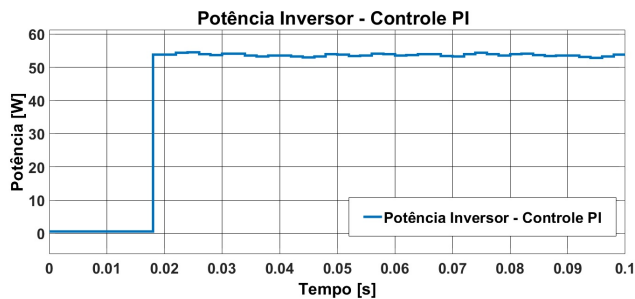


Figura 11. Potência injetada pelo inversor com emprego do controlador PI.

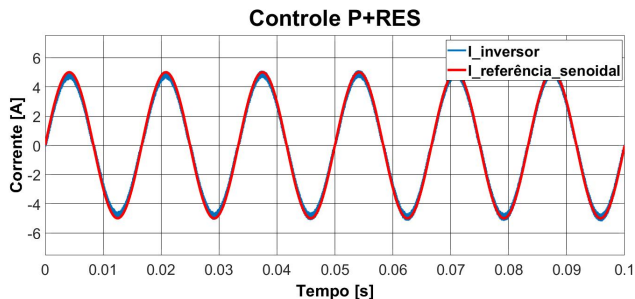


Figura 12. Operação em regime permanente do controlador P+RES.

Na Figura 12 é possível ver o resultado da simulação com emprego do controlador P+RES para uma corrente constante de 5A. Observa-se que o controlador segue a referência da corrente com uma tendência de correção do estado estacionário com um erro de 1,86% após 0,1s de simulação, sendo esse valor obtido pela diferença percentual dos valores RMS medidos de ambas as correntes. O valor da THD da corrente injetada na rede elétrica é de 3,85% como apresentado na Figura 13. Este valor é menor quando comparado com o valor de THD quando o controlador MPC-FCS é empregado. Neste caso, o valor é 6,51% (Figura 7). A potência injetada na rede elétrica pode ser observada na Figura 14 e seu valor inicial é de aproximadamente 55W com a tendência de aumento devido a correção do erro no estado estacionário. Inicialmente o valor é menor que o valor da potência injetada pela proposta desta trabalho que é de 60W (Figura 8), isso

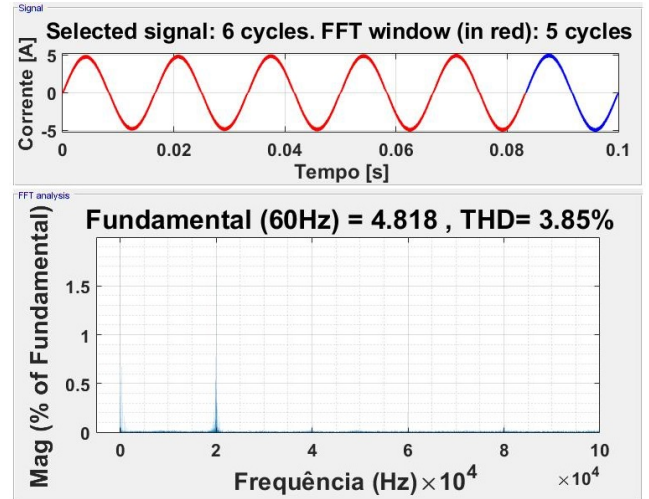


Figura 13. Distorção harmônica apresentada pela corrente a ser injetada na rede elétrica.

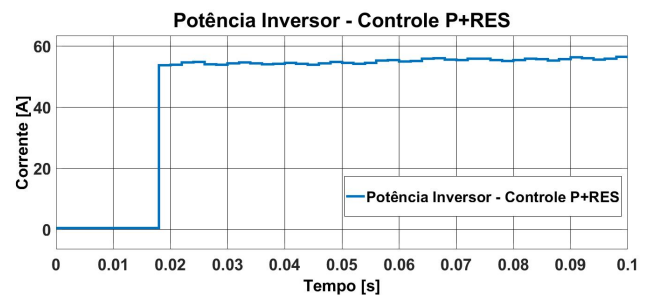


Figura 14. Potência injetada pelo inversor com emprego do controlador P+RES.

ocorre devido ao erro entre a referência de corrente e a corrente injetada na rede elétrica ser de 0,19%.

4.4 Comparação de desempenho entre os controladores MPC-FCS, PI e o P+RES

Com a finalidade de facilitar a comparação entre os controladores MPC-FCS, PI e P+RES foi elaborada a Tabela 2 com os resultados obtidos nas simulações. Observa-se que o melhor tempo de resposta para correção do erro em estado estacionário foi obtido pelo controle MPC-FCS com o valor em torno de 0,02s em comparação ao controle P+RES que foi em torno de 0,4s, já o controle PI teve um tempo de resposta praticamente igual ao MPC-FCS, porém manteve o erro estacionário constante.

Esses tempos foram medidos através do gráfico de potência ativa na saída do inversor monofásico, o que mostra um desempenho superior do controle MPC-FCS em relação ao tempo de resposta, em contrapartida o THD da corrente injetada na rede elétrica pelo MPC-FCS ficou em 6,51%, valor superior ao apresentado pelo controle PI com THD de 3,89% e o controle P+RES com THD de 3,85%.

5. CONCLUSÃO

Este artigo abordou uma proposta de controle preditivo para aplicação em um inversor monofásico em ponte H com filtro LC conectado à rede elétrica, com a finalidade de

demonstrar as suas características e realizar a comparação com os controladores PI e P+RES. Para sintonia dos ganhos presentes na malha do controle PI, foi utilizada uma abordagem no domínio da frequência para obtenção de margens de estabilidade e faixas de passagem satisfatórias, para o P+RES foi mantido o ganho proporcional e ajustado de forma empírica o ganho integral e a frequência de ressonância.

No caso deste trabalho o MPC (*Model Predictive Control*) demonstrou oferecer uma alternativa de baixa complexidade e eficaz aos algoritmos de controle clássicos com modulação por largura de pulso (PWM) para controlar o fluxo de energia elétrica usando conversores de potência.

Os resultados de simulação mostram que o controle preditivo é capaz de regular a corrente a ser injetada na rede elétrica atendendo à referência de corrente de forma superior ao controles PI e P+RES, tanto no estado estacionário como no estado transitório, dessa forma, apresenta uma eficiência energética superior.

Dito isto, tem-se como desafio futuro aprimorar o algoritmo preditivo com operação em frequência fixa e de melhorar a sua de distorção harmônica total das correntes, que apresenta valor superior quando comparado com o controlador PI.

O controle preditivo proposto nesse trabalho não exige a implementação de algoritmos complexos, tão pouco parâmetros a serem ajustados, por outro lado, faz-se necessário um ajuste adequado para o controlador PI, tornando-o assim, uma proposta de controle de baixa complexidade de implementação. Porém, por efeito do cálculo da sequência de chaves a serem acionadas o sistema trabalha com uma frequência de chaveamento variável.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aqui o apoio institucional da UFABC e do seu respectivo programa de pós graduação em engenharia elétrica.

REFERÊNCIAS

- Atia, Y. and Salem, M. (2013). Microcontroller-based improved predictive current controlled vsi for single-phase grid-connected systems. *Journal of Power Electronics*, 13(6), 1016–1023.
- Bhardwaj, M. and Subharmanya, B. (2013). *Application Report - PV Inverter Design Using Solar Explorer Kit*. Texas Instruments.
- Bode, G. and Holmes, D. (2000). Implementation of three level hysteresis current control for a single phase voltage source inverter. In *2000 IEEE 31st Annual Power Electronics Specialists Conference. Conference Proceedings (Cat. No. 00CH37018)*, volume 1, 33–38. IEEE.

Tabela 2. Comparação de desempenho entre os controladores estudados.

Controladores	THD[%]	Erro[%]	Resposta[s]	Eficiência[%]
MPC-FCS	6,51	0,19	0,02	99,7
PI	3,89	5,68	0,02	94,33
P+RES	3,85	1,86	0,4	98,15

- Cherati, S., Azli, N., Ayob, S., and Mortezaei, A. (2011). Design of a current mode pi controller for a single-phase pwm inverter. In *2011 IEEE Applied Power Electronics Colloquium (IAPEC)*, 180–184. IEEE.
- Chirapo, K., Oliveira, A., Sguarezi Filho, A., Pelizari, A., Di Santo, S., and Costa, E. (2020). P+ res controller applied to the direct power control of switched reluctance generator. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, 31(2), 360–366.
- Chirapo, K.A.C. (2018). *Controle de Potência do Gerador de Relutância Variável de 12/8 Utilizando o Controlador Fuzzy PI Auto-Ajustável*. Master's thesis, UFABC - Universidade Federal do ABC.
- Elthokaby, Y., Elshafei, A., Abdel-Rahim, N., and Abdel-Aliem, E.S. (2016). Finite-control set model-predictive control for single-phase voltage-source ups inverters. In *2016 Eighteenth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON)*, 261–265. IEEE.
- Fu, X. and Li, S. (2015). Control of single-phase grid-connected converters with lcl filters using recurrent neural network and conventional control methods. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 31(7), 5354–5364.
- Liu, C., Lei, L., Chen, Q., Zhang, L., and Quan, S. (2017). Model predictive control of single phase grid-connected inverter with lc filter. In *2017 32nd Youth Academic Annual Conference of Chinese Association of Automation (YAC)*, 115–119. IEEE.
- Mayne, D.Q., Rawlings, J.B., Rao, C.V., and Sokaert, P.O. (2000). Constrained model predictive control: Stability and optimality. *Automatica*, 36(6), 789–814.
- Menezes, L.M. (2007). Projeto inversor-desenvolvimento de uma fonte ininterrupta de energia com possibilidade de uso em sistema fotovoltaico.
- Ogata, K. (2011). *Engenharia de controle moderno*. PRENTICE HALL BRASIL. URL <https://books.google.com.br/books?id=iL3FYgEACAAJ>.
- Pimentel, S.P. et al. (2006). *Aplicação de inversor multinível como filtro ativo de potência*. Master's thesis, UNICAMP - Universidade Estadual de Campinas.
- Premrudeepreechacharn, S. and Poapornsawan, T. (2000). Fuzzy logic control of predictive current control for grid-connected single phase inverter. In *Conference Record of the Twenty-Eighth IEEE Photovoltaic Specialists Conference-2000 (Cat. No. 00CH37036)*, 1715–1718. IEEE.
- Rodriguez, J. and Cortes, P. (2012). *Predictive control of power converters and electrical drives*, volume 40. John Wiley & Sons.
- Silva, A.F.B.O., Silva, S.M., Santos, C.H.G.d., and Cardoso Filho, B.d.J. (2013). Aplicação do controle repetitivo a inversor pwm monofásico com filtro lc de saída utilizado em fonte programável ca. *Revista Eletrônica de Potência - Sobreap*.
- Song, W., Deng, Z., Wang, S., and Feng, X. (2015). A simple model predictive power control strategy for single-phase pwm converters with modulation function optimization. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 31(7), 5279–5289.
- Teodorescu, R., Blaabjerg, F., Liserre, M., and Loh, P.C. (2006). Proportional-resonant controllers and filters for grid-connected voltage-source converters. *IEEE Proceedings-Electric Power Applications*, 153(5), 750–762.

- Wu, T.F., Nien, H.S., Shen, C.L., and Chen, T.M. (2005). A single-phase inverter system for pv power injection and active power filtering with nonlinear inductor consideration. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 41(4), 1075–1083.
- Yagnik, U.P. and Solanki, M.D. (2017). Comparison of l, lc & lcl filter for grid connected converter. In *2017 International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICEI)*, 455–458. IEEE.